ارزیابی ریسک آتش‌سوزی شبکه‌ی گاز در کاربری‌های مختلف شهری پس از زلزله (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران)★

علیرضا صادقیان[۱]   بابک امیدوار[۲]

چکیده *در این مقاله الگوریتمی برای تخمین ارزیابی ریسک آتش‌سوزی شبکه‌ی گاز پس از زلزله در کاربری‌های مسکونی، صنعتی، آموزشی و دولتی منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران براساس شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه شده است. مدول‌های تحلیل خطر، برآورد آسیب‌پذیری، تحلیل نشت و شکست در خطوط لوله، تحلیل احتمال اشتعال در نقاط نشت، تحلیل جریان گاز در خطوط لوله و تحلیل پیامد اشتعال به‌کارگرفته شده است. وقوع ٤ نشت، ۱ شکست و ۲ اشتعال در شدیدترین حالت برآورد شده و مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده ۲۵۲۳۳ مترمربع و تعداد افراد تحت تأثیر ۱٤٦ نفر محاسبه شده است. پس از اعمال راهکار پیشنهادی، نتایج مذکور در حالت نشت ۷۵٪، در حالت شکست ۱۰۰٪ و در حالت اشتعال ۱۰۰٪ تقلیل یافته است.*

واژه‌های کلیدی ارزیابی ریسک، آتش‌سوزی، شبکه‌ی گاز، شبکه‌ی برق، کاربری‌های شهری، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تهران.

Fire Risk Assessment of Gas Infrastructure on Different Urban land Uses after Earthquake (Case Study: District No. 20 of Tehran Metropolitan)

A. Sadeghian   B. Omidvar

Abstract *In this research an algorithm based on Monte Carlo simulation is introduced to assess the risk of fire following earthquake in residential, industrial, educational, and governmental land-uses in district No. 20 of Tehran. The proposed algorithm consist of different modules including hazard analysis, vulnerability assessment, leak and break analysis of damaged pipeline, ignition probability analysis of the damaged pipeline, gas flow analysis of pipeline, ignition and consequence analysis. Based on the results of this research in the extreme state, four leaks, one break, and two ignitions were estimated. In addition, the total affected area of the four mentioned occupancies includes 25233 square meters and the total affected population of 146 people was acquired. By applying proposed mitigation measure, the mentioned results in the case of leak could be reduced by 75%, in the case of break reduced by 100%, and in the case of ignition it was reduced by 100%.*

Keywords Risk Assessment, Fire, Gas Network, Electricity Network, Urban land uses, Monte Carlo Simulation, Tehran.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۳/۲٦ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۷ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده‌ی محیط زیست، دانشگاه تهران.

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی محیط زیست، دانشگاه تهران.

مقدمه

شهر تهران در دامنه‌ی جنوبی البرز مرکزی و بر روی نهشته‌های آبرفتی کواترنر بنا شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با وجود گسل‌های لرزه‌زا و کواترنر نظیر راندگی شمال تهران، کهریزک، ری و پیشوا و ده‌ها گسل کوچک در بستر شهر تهران و نیز با توجه به تاریخچه‌ی لرزه‌ای این شهر، احتمال رویداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگی بیش از هفت ریشتر در این شهر می‌تواند قابل انتظار باشد [۱]. در این میان نامقاوم بودن بسیاری از ساختمان‌های تهران در برابر زلزله و نیاز به مقاوم‌سازی شریان‌های حیاتی، ضرورت تحلیل احتمال رویداد حریق پس از زمین‌لرزه را در این شهر بدیهی می‌نماید. اشتعال خطوط لوله‌ی گاز تهران پس از زلزله می‌تواند یکی از موارد مهم مخاطرات این شهر باشد. انشعابات گاز در مجاور ساختمان‌های نامقاوم و آسیب‌های ناشی از ساختمان و هم‌چنین گذر لوله‌های گاز از روی گسل‌های گوناگون و یا نزدیکی آنها می‌تواند موجب بروز خطرهای فراوانی شود. به‌علاوه مسائلی از قبیل وقوع جرقه در نتیجه‌ی اتصال کابل‌های برق، می‌تواند احتمال وقوع آتش‌سوزی پس از زلزله را تشدید نماید. از طرفی به‌نظر می‌رسد با توجه به قدمت منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران، این منطقه پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی در برابر سوانح احتمالی از جمله زلزله و آتش‌سوزی پس از آن را داشته باشد. لذا در این پژوهش، خطرپذیری آتش‌سوزی کاربری‌های شهری پس از زلزله در خطوط لوله‌ی گاز منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران مورد تحلیل قرار گرفته است.

تجارب مختلفی از بروز آتش‌سوزی پس از زلزله در محیط‌های شهری وجود دارد. زلزله‌های شهر سن‌فرانسیسکو در سال ۱۹۰۶ و شهر توکیو در سال ۱۹۲۳ به‌علت آتش‌سوزی‌های بعد از آن، به‌عنوان دو مورد از بدترین فجایع تاریخ بشری به‌حساب می‌آیند. به‌همین علت اولین تحقیقات در زمینه‌ی آتش‌سوزی پس از زلزله توسط دو کشور آمریکا و ژاپن انجام شده است. فعالیت‌های تحقیقاتی انجام‌شده بر روی اشتعال‌های پس از زلزله که به مدل‌سازی این پدیده منجر شده است، عمدتاً غیرتحلیلی و براساس داده‌های آماری آتش‌سوزی پس از زلزله‌های آمریکا و ژاپن بوده است [2].

میزونو (Mizuno) در سال ۱۹۷۸ اولین مدل اشتعال پس از زلزله را براساس داده‌های آماری آتش‌سوزی پس از زلزله‌های ژاپن ارائه داد [3]. در سال ۱۹۸٦ اسکاتورن (Scawhorn) مدل اشتعال پس از زلزله برای کانادا را با استفاده از روش فوق (داده‌های آماری آتش‌سوزی پس از زلزله) براساس زلزله‌های کالیفرنیا از سال ۱۹۷۱ تا آن تاریخ ارائه داد [4]. در سال ۱۹۹۱ کوسینز و همکاران (Cousins et al) از این مدل برآورد تعداد اشتعال پس از زلزله برای کشور زلاندنو استفاده نمودند [5]. ادینگر و همکاران (Eidinger et al) در سال ۱۹۹۵ با در نظر گرفتن تمامی زلزله‌های قرن بیستم آمریکا تا آن زمان و حتی آن زلزله‌هایی که در مدل اسکاتورن در نظر گرفته نشده بود، رابطه‌ی جدید را برای برآورد اشتعال مؤثر و غیرعمدی پس از زلزله ارائه نمود [6]، از این رابطه از سال ۲۰۰۱ در متدولوژی HAZUS استفاده شده است [7]. هم‌چنین مطالعاتی توسط تریفوناس و تودورووااسکا (Trifunace & Todorovaska) در سال ۱۹۹۸ انجام شده است که در آن تعداد اشتعال‌های پس از زلزله ۱۹۹٤ نورتریج به‌عنوان توابعی از شدت مرکالی اصلاح شده، تعداد شکستگی‌های لوله‌های آب، تعداد ساختمان‌های علامت‌گذاری شده و بیشینه سرعت زمین صورت گرفته است و هم‌چنین برای آنها تعدادی منحنی پیشنهاد شده است [8]. ویلیامسون و گرونر (Williamson & Groner) نیز در سال ۲۰۰۰ مطالعاتی را بر روی اشتعال‌های پس از زلزله به‌دلیل تخریب شبکه‌ی توزیع برق و گاز انجام داده‌اند که آسیب‌پذیری بیشتر را برای مناطق پرجمعیت و یا با بافت فرسوده، نسبت به وقوع اشتعال‌های پس از زلزله نشان می‌دهد [9]. آنچه از مطالعات پیشین درباره آتش‌سوزی پس از زلزله برمی‌آید این است که اکثر مدل‌های تخمین اشتعال‌های پس از زلزله بر مبنای داده‌های تجربی و کارهای آماری بوده‌اند و تفاوتی میان

اشتعال‌های داخل و خارج ساختمانی قائل نشده‌اند و آنها را جداگانه مدل نکرده‌اند. در سال ۲۰۰۸ ذوالفقاری و همکاران مدلی تحلیلی را برای برآورد احتمالی اشتعال‌های داخل ساختمانی ارائه کرده‌اند. در مدل آنها احتمال یک اشتعال در هر ساختمان برای یک زلزله سناریو محاسبه شده است و عواملی نظیر تخریب اجزای سازه‌ای، اجزای غیرسازه‌ای ساختمان و واژگونی محتویات ساختمان، چگالی ساختمان‌ها (مساحت ساختمان‌ها، تعداد طبقات ساختمان‌ها)، انواع محتویات آنها، کاربری ساختمان‌ها، زمان زلزله در سال و روز و عدم قطعیت مرتبط با هر یک از آنها در محاسبه‌ی اشتعال در نظر گرفته شده است [10]. ییلدیز و کارامان (Yildiz & Karaman) در سال ۲۰۱۲، یک مدل فیزیکی به‌منظور تخمین تعداد آتش‌سوزی‌های پس از زلزله در داخل ساختمان و محل آن برای مناطق شهری ارائه دادند. در این مدل علاوه بر شدت مرکالی اصلاح شده و بیشینه شتاب زمین، عوامل دیگری نظیر سیستم تجهیزات ساختمانی (سیستم گاز و برق)، لوازم پرخطر (بخاری، اجاق گاز و...) و لوازم کم‌خطر (کامپیوتر، تلویزیون و...) در نظر گرفته شده است [11].

تحقیقات دیگری نیز در رابطه با بررسی دلایل وقوع اشتعال‌های پس از زلزله انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به کارهای اسکاتورن و همکارانش در سال ۲۰۰۵ بر روی اثرات تخریب شبکه‌ی توزیع گاز بر وقوع اشتعال‌های پس از زلزله اشاره نمود. آنها بیان کردند که ۲۶٪ اشتعال‌های اتفاق افتاده پس از زلزله نورتریج به‌دلیل تخریب شبکه‌ی توزیع گاز بوده است [12]. بهنام‌فر و رجبی‌پور در سال ۲۰۰۸، مدلی را برای تخمین احتمالاتی گسترش آتش-سوزی پس از زلزله که ناشی از خرابی خطوط لوله‌ی گاز است، ارائه دادند. این مدل شامل ارزیابی سناریوهای خرابی خطوط لوله، مدل‌سازی اشتعال گاز طبیعی و مدل‌سازی گسترش آتش‌سوزی می‌باشد که با شبیه‌سازی عددی مدل پیشنهادی، منحنی‌هایی برحسب زمان برای نشان دادن چگونگی آتش‌سوزی و افزایش خسارات پس از زلزله در مناطق مختلف به‌دست آمده است. این منحنی‌ها می‌تواند برای تعیین اولویت در برنامه‌های کاهش و پیشگیری در نواحی شهری به‌کار برده شود [13]. در سال ۲۰۱۱ اسپوزیتو (Esposito) پایگاه داده‌ی سیستم اطلاعات جغرافیایی را توسعه داد که این پایگاه، داده‌های فیزیکی و خصوصیات عملکردی سیستم توزیع گاز لاکویلا (L'Aquila) را جهت توصیف رفتار لرزه‌ای تمامی اجزا دربر می‌گرفت. منطقه‌یی لاکویلا برحسب خطرات تغییرشکل ناپایدار و پایدار زمین شناسایی شد و در ادامه به‌منظور ارزیابی پاسخگویی سیستم برحسب شاخص‌های عملکردی؛ شبیه‌سازی احتمالاتی برای حالت‌های مختلف اجرا گردید [14].

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران با مساحتی در حدود ۲۳ کیلومتر مربع داخل محدوده‌ی شهری و ۱۵۳ کیلومتر مربع حریم، دارای ۳۷۸۴٤۵ نفر جمعیت می‌باشد که در منتهی‌الیه جنوب شرقی تهران قرار دارد. از لحاظ تقسیمات شهرداری، منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران به ۷ ناحیه‌ی شهرداری و ۲۲ محله‌ی شهری تقسیم می‌شود [۱۵]. در شکل (۱) محدوده‌ی منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران با توجه به نواحی ۷ گانه آن نشان داده شده است.

منطقه‌ی ۲۰ در گستره‌ی فرونشست شمال ایران مرکزی (دشت تهران- ری) جای دارد. این بخش که قسمت‌های مرکزی و جنوبی شهر تهران، شهر ری و جنوب آن را فرا می‌گیرد، از نهشته‌های آبرفتی جوان و کمی قدیمی‌تر پوشیده شده است و مخروط افکنه‌های رودخانه‌های کن، کرج و جاجرود قسمت‌های جنوبی آن را می‌پوشاند [١٦].

گسل‌های شمال و جنوب ری، گسل‌های موجود در منطقه می‌باشد. گسل شمال ری به‌صورت دیواره‌ی فرسوده‌ای به بلندی ۲ متر با راستای شرقی- غربی و درازای ١٦/۵ کیلومتر در شمال و شمال غربی شهر ری قرار گرفته است. گسل جنوب ری به شکل دیواره‌ی کوتاه (میان ۱ تا ۲ متر) و درازای کلی حدود ۱۸/۵ کیلومتر است و ادامه‌ی شرقی و غربی آن در زیر

رسوبات جوان رودخانه‌ای و دشتی ناپدید می‌شود [۱٦]. در شکل (۲) موقعیت گسل‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.

روش‌شناسی تحقیق

فرآیند تحقیق حاضر شامل پنج گام اصلی است.

۱- تحلیل خطر زلزله.

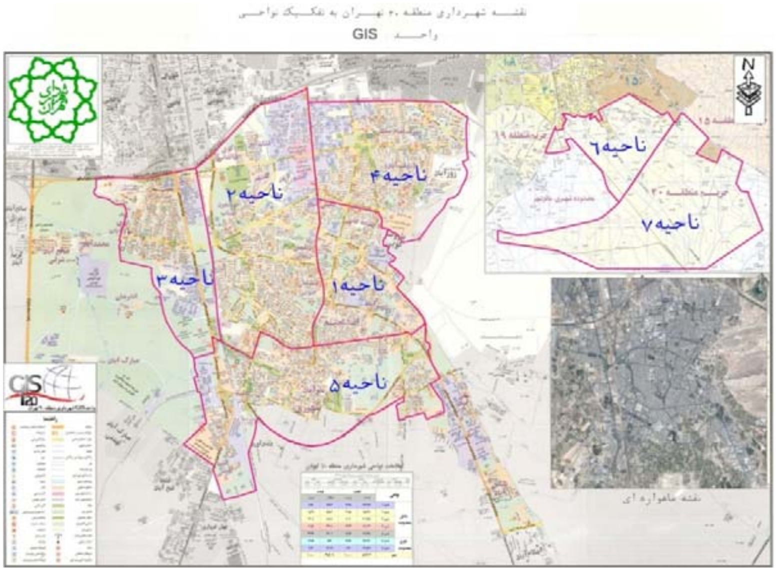
۲- برآورد آسیب پذیری شکست در برابر زلزله.

۳- تحلیل خطر آتش‌سوزی پس از زلزله.

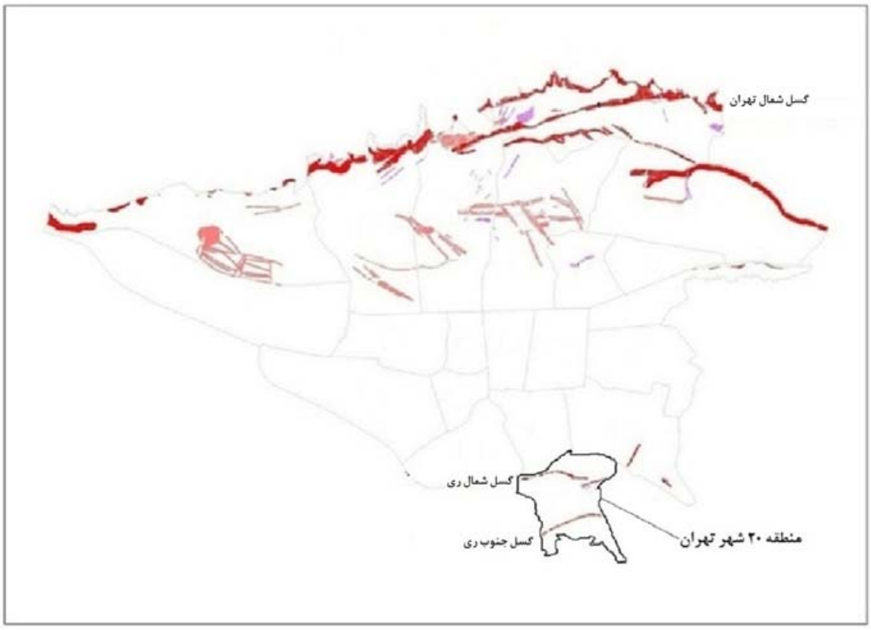
٤- تحلیل جریان شبکه گاز.

٥- تحلیل اشتعال و پیامد آن پس از زلزله.

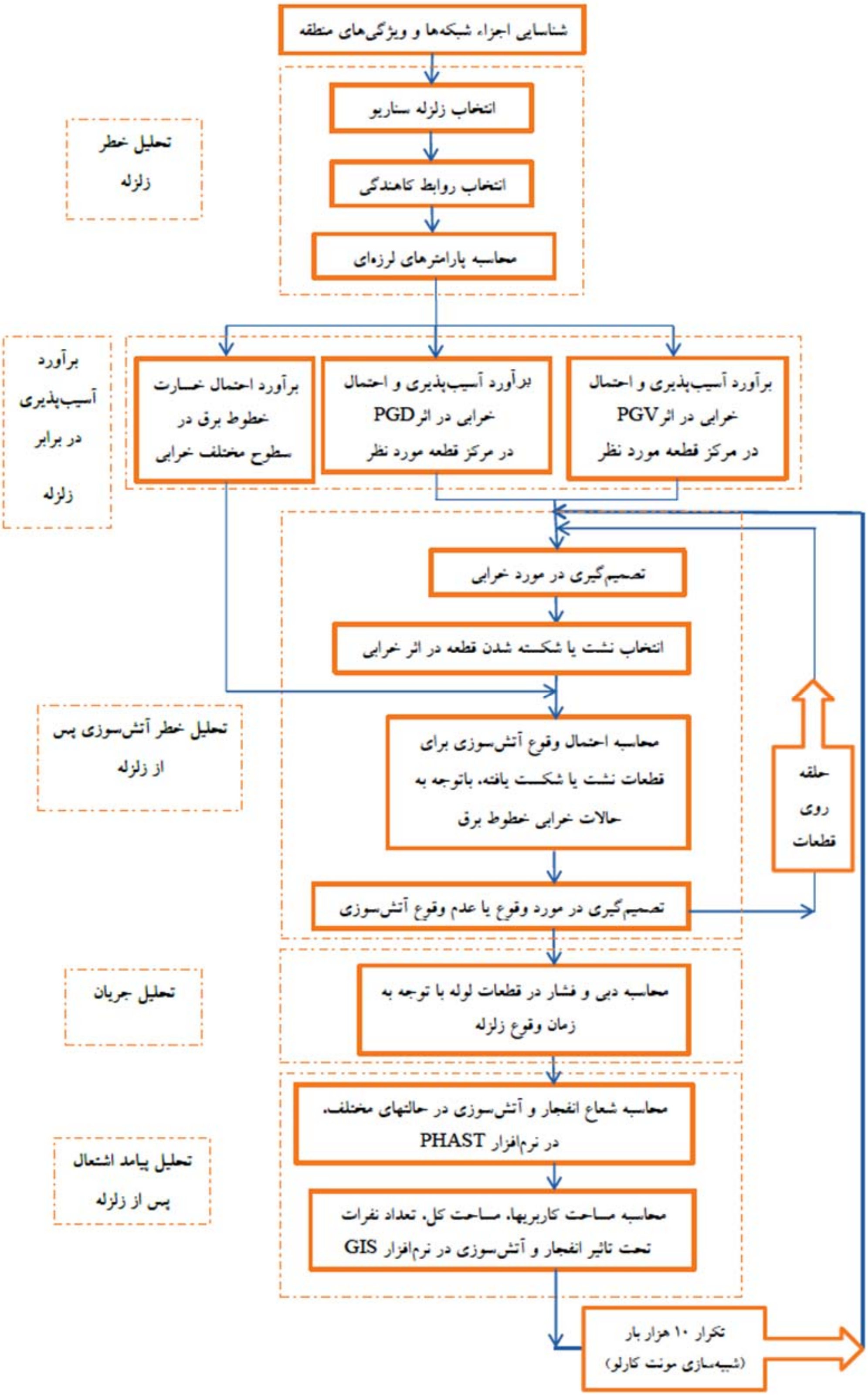
در شکل (۳) الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۱ محدوده‌ی منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران با توجه به نواحی ۷ گانه [۱٥]



شکل ۲ موقعیت گسل‌های مورد مطالعه



شکل ۳ الگوریتم مورد استفاده در تحقیق

در این تحقیق در گام اول، به منظور تحلیل خطر زلزله، اجزای شبکه‌های گاز و برق و هم‌چنین ویژگی‌های منطقه‌ی مورد مطالعه و کاربری‌های موجود، شناسایی شد و اطلاعات مربوط به آنها با استفاده از نرم‌افزار «ARC GIS» در لایه‌های اطلاعاتی مجزا به سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی وارد شد. سپس سه سناریوی زلزله برای منطقه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفته شد و پس از انتخاب روابط کاهندگی مناسب (رابطه‌ی زارع و رابطه‌ی قدرتی و همکاران)، پارامترهای لرزه‌ای (بیشینه شتاب و سرعت زمین) برای هر یک از قطعات خطوط لوله گاز که قبلاً در محیط GIS صورت گرفته بود، محاسبه شد.

در گام دوم، به‌منظور برآورد آسیب‌پذیری در اثر زلزله، نرخ تعمیر و احتمال خرابی در اثر ارتعاش زلزله براساس حداکثر سرعت زمین (Peak Ground Velocity) و هم‌چنین نرخ تعمیر و احتمال خرابی در اثر تغییرمکان دائمی زمین (Permanent Ground Deformation) با استفاده از روش‌شناسی HAZUS در مرکز هر یک از قطعات لوله‌ی در نظر گرفته‌شده برای هر سه سناریوی زلزله محاسبه شد. در این مرحله به‌منظور تشخیص این‌که قطعه‌ی خراب شده دچار نشت یا شکست شده است، احتمال خرابی قطعه‌ی مورد نظر در هر تکرار شبیه‌سازی مونت‌کارلو با یک عدد تصادفی مقایسه شده و در مورد نحوه‌ی خرابی آن تصمیم‌گیری گردید. سپس احتمال خسارت خطوط هوایی شبکه‌ی برق در سطوح مختلف خرابی در منطقه‌ی مورد نظر محاسبه شد.

در گام سوم، به‌منظور برآورد احتمال آتش‌سوزی هر یک از قطعات خطوط گاز از روش درخت خطا استفاده شد. در این مرحله، در درخت خطای مورد نظر دو عامل اصلی برای آتش‌سوزی پس از زلزله؛ منبع جرقه و خرابی شبکه‌ی گاز در نظر گرفته شد که به این منظور احتمال وجود سوخت قابل اشتعال برابر با احتمال شکست و یا نشت خطوط لوله‌ی گاز در نظر گرفته شد. احتمال وجود منبع جرقه برابر با احتمال جرقه در اثر تخریب خطوط هوایی شبکه‌ی برق فرض شد. در نهایت با ترکیب احتمال اشتعال در اثر نشت و شکست در سطوح مختلف خرابی شبکه‌ی برق، احتمال اشتعال هر یک از قطعات، به‌دست آمد. در این مرحله نیز به‌منظور تشخیص این‌که قطعه‌ی مورد نظر مشتعل می‌شود یا نه، احتمال اشتعال قطعه‌ی مورد نظر در هر تکرار شبیه‌سازی مونت‌کارلو با یک عدد تصادفی مقایسه شد و در مورد آن تصمیم‌گیری گردید.

در گام چهارم، با مشخص بودن نقاط دچار نشت و شکست شده در خطوط لوله با استفاده از آنالیز جریان میزان گاز خروجی از محل‌های خسارت‌دیده محاسبه گردید. به این منظور برای در نظر گرفتن سناریوی مصرف، ابتدا زمان وقوع زلزله در دو بازه‌ی زمانی صبح و شب در نظر گرفته شد. سپس آنالیز جریان صورت گرفت و با استفاده از رابطه‌ی Panhandle B حجم و فشار گاز داخل قطعات لوله و میزان نشت به‌منظور تکمیل اطلاعات لازم برای آنالیز اشتعال و انفجار محاسبه گردید.

در گام پنجم، به‌منظور تحلیل اشتعال و پیامد آن پس از زلزله، اطلاعات لازم برای محاسبه‌ی شعاع آتش‌سوزی قطعات مشتعل شده با استفاده از نرم‌افزار PHAST، تکمیل شد و شعاع هفت نوع آتش با شدت-های مختلف در نظر گرفته شده محاسبه گردید. در این راستا، کاربری‌های مسکونی، صنعتی، آموزشی و دولتی به‌دلیل نزدیکی به خطوط لوله و در معرض قرارگیری زیاد، برای تحلیل انتخاب شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار GIS، مقادیر مربوط به هفت آنالیز آتش به شکل بیضی بر روی قطعات خطوط لوله‌ی گاز که دچار اشتعال می‌شوند، انداخته شد و موارد زیر محاسبه گردید:

۱- مساحت کاربری‌هایی که تحت تأثیر آتش

ایجادشده در اثر زلزله قرار گرفته‌اند.

۲- کل مساحتی که تحت تأثیر آتش ایجادشـده در اثـر زلزله قرار گرفته‌است.

۳- تعداد کل نفراتی که تحت تأثیر آتش ایجادشـده در اثر زلزله قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق فرآیند مذکور (از گـام ۲ تـا انتهـا) برای هر سناریوی زلزله، با توجه به روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی احتمالات از طریق تعداد دفعات زیـاد (۱۰ هزار بار) تکرار شد تا عدم قطعیت‌های مربوط بـه این‌که در هر سناریوی زلزله کـدام لولـه‌هـا در معـرض شکست یا نشت و هم‌چنین اشـتعال قـرار مـی‌گیرنـد، مـدل‌سـازی گـردد. در نهایـت، نتـایج خروجـی بـرای سناریوهای در نظر گرفته شده مورد تحلیل آماری قرار گرفت و تابع توزیع احتمال متغیرهای خروجی و عـدم قطعیت آنها تعیین شد.

در بخش بعدی جزئیات بـه کـارگیری الگـوریتم پیشنهادی در منطقه‌ی مورد مطالعه ذکر شده است.

پیاده‌سازی الگوریتم

تحلیل خطر زلزله. با توجه بـه ایـن‌کـه در مطالعـات صورت گرفته توسط جایکـا و پژوهشـگاه بـین‌المللـی زلزله‌شناسی و مهندسـی زلزلـه در قالـب طـرح جـامع لرزه‌ای تهـران [17]، تـأثیرات گسـل‌هـای مختلـف بـر مناطق شهری تهران دیده شده است در این تحقیق نیـز تأثیر فعال شدن گسل‌های مختلف برمنطقه‌ی مورد نظر بررسی شده است. بر این اساس، سه سناریوی محتمـل وقوع زلزله در اثر گسل شمال ری، گسل جنوب ری و گسل شمال تهران در نظر گرفته شده است. مشخصات این سه سناریو در جدول (۱) آمده است.

با توجه به این‌کـه تحلیـل جریـان شـبکه‌ی گـاز منطقـه‌ی مـورد مطالعـه، بـدون در نظـر گـرفتن تمـام ورودی‌های موجود در سطح شهر امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ بنابراین مطابق شکل (٤) دو خط اصـلی لولـه‌ی انتقـال گاز کـه یکـی ۲۰ اینچـی اسـت و دیگـری ۳۰ اینچـی می‌باشد، در محاسبات و تحلیل‌ها در نظر گرفته شده‌اند و خطوط دیگر (چهار اینچـی و ۱۲ اینچـی) بـه‌عنـوان مصرف‌کننده در نظر گرفته شده‌اند. به‌منظور محاسـبه‌ی پارامترهـای لـرزه‌ای، لولـه‌ی انتقـال ۲۰ اینچـی بـه ۱۲ سـگمنت و لولـه انتقـال ۳۰ اینچـی بـه ٥ سـگمنت، قطعه‌بندی شده است.

پس از انتخاب زلزله‌های سناریو برای محـدوده‌ی مورد مطالعه، باید پارامترهای مربوط بـه ایـن زلزلـه‌هـا محاسـبه گردنـد. در ایـن مطالعـه از میـانگین روابـط کاهندگی زارع [۱۸] و کاظمی و همکـاران [19] بـرای حداکثر شتاب زمین و حداکثر سـرعت زمـین اسـتفاده شده است.

جدول ۱ سناریوهای انتخاب‌شده برای زلزله

شماره سناریو	محل احتمالی وقوع زلزله	بزرگای زلزله سناریو (ریشتر)	عمق کانونی (کیلومتر)	عرض جغرافیایی زلزله احتمالی (UTM)	طول جغرافیایی زلزله احتمالی (UTM)
۱	روی گسل شمال ری	٦/٧	٥	۳۹٤۱٤۱۳/٤٦	٥۳۸۲٤۱/٧٦
۲	روی گسل جنوب ری	٦/٧	٥	۳۹۳۸٤٥۲/٧٧	٥۳۹۱٤۰/۰۲
۳	روی گسل شمال تهران	٧/۲	٥	۳۹٦۱۰٧٥/۲۳	٥۳٤٧۰۱/۰۲



شکل ٤ نقشه خطوط لوله‌های ۲۰ و ۳۰ اینچی شبکه‌ی گاز منطقه‌ی ۲۰ تهران

برآورد آسیب‌پذیری در برابر زلزله. پس از محاسبه‌ی بیشینه شتاب و سرعت زمین برای سناریوهای مختلف زلزله در محل مرکز قطعات خطوط لوله‌ی موجود در سیستم مورد مطالعه، احتمال خرابی این قطعات تخمین زده می‌شود، چرا که این احتمالات به‌عنوان ورودی درخت خطا خواهند بود. برای به‌دست آوردن احتمال خرابی هر یک از قسمت‌های خطوط لوله در اثر ارتعاش زلزله می‌توان از رابطه‌ی (۱) استفاده کرد.

$$P_f = 1 - \exp(-R.R * L) \qquad (۱)$$

در این رابطه، R.R نرخ تعمیر، L طول قطعه لوله‌ی مورد نظر برحسب متر می‌باشد. مقدار R.R حاصل از لرزش زمین نیز براساس روش‌شناسی HAZUS، از رابطه‌ی (۲) به‌دست می‌آید [7].

$$R.R \approx 0.0001 * PGV^{(2.25)} \qquad (۲)$$

در این روش‌شناسی در اثر لرزش زلزله ۲۰ درصد مقدار تعمیرها، شکست و ۸۰ درصد آنها نشت خواهد بود. این مقدار R.R محاسبه شده از رابطه‌ی (۲) برای خطوط لوله‌ی ترد به‌کار می‌رود و برای خطوط لوله‌ی انعطاف‌پذیر (فولادی با جوش قوسی و پی‌وی‌سی) می‌بایست از ضریب اصلاح ۰/۳ برای نرخ تعمیر استفاده شود. در این مطالعه خطوط لوله‌ی فولادی با جوش‌گازی در نظر گرفته شده است. هم‌چنین مقدار نرخ تعمیر در اثر شکست دائمی زمین از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود [7].

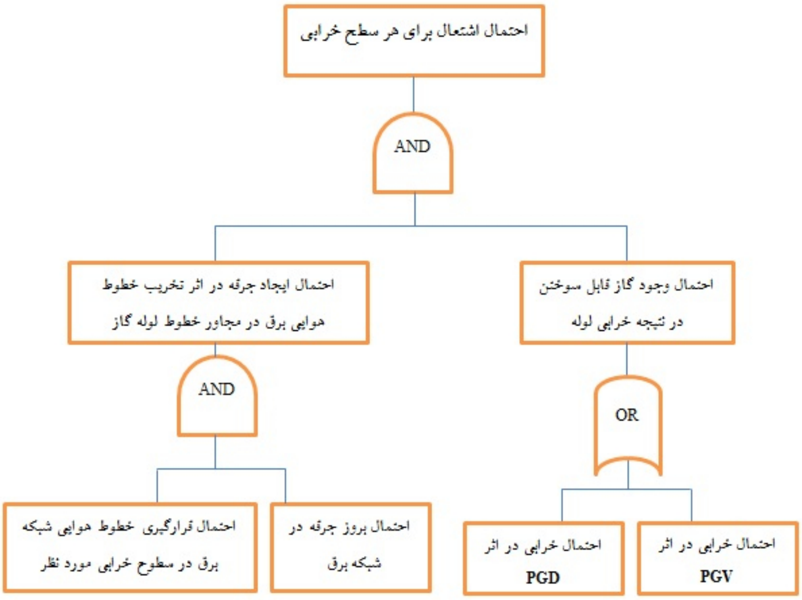
$$R.R \approx Pr\,[Liquefaction] \,.\, PGD^{(0.56)} \qquad (۳)$$

در اثر شکست زمین ۲۰ درصد خرابی‌ها، نشت و ۸۰ درصد خرابی‌ها، شکست فرض می‌شود.

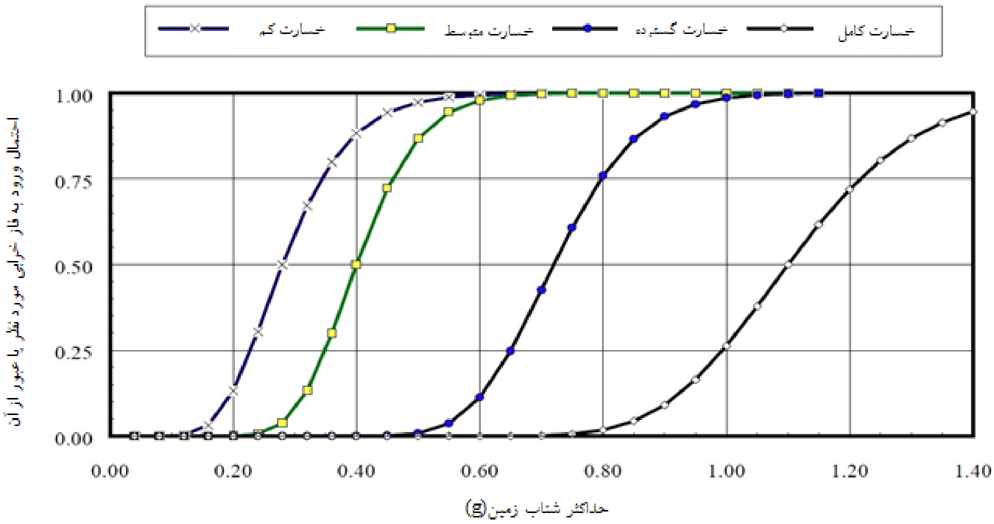
تحلیل خطر آتش‌سوزی پس از زلزله. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، در این تحقیق برای محاسبه‌ی احتمال اشتعال خطوط آسیب‌دیده از درخت خطا استفاده شده است که در آن دو عامل اصلی؛ منبع جرقه و خرابی شبکه‌ی گاز در نظر گرفته شده است. احتمال وجود سوخت قابل‌اشتعال برابر با احتمال خرابی خطوط لوله‌ی گاز و احتمال وجود منبع جرقه برابر با احتمال جرقه در اثر تخریب خطوط هوایی شبکه‌ی برق فرض می‌شود. در ارزیابی احتمال خرابی خطوط لوله، پارمترهای لرزه‌ای مؤثر بر تخریب خطوط

لوله، حداکثر تغییرمکان دائمی زمین و حداکثر سرعت زمین در نظر گرفته شده است.

در این تحقیق ایجاد جرقه در اثر تخریب خطوط هوایی شبکه‌ی برق در نظر گرفته شده است. میزان آسیب‌پذیری شبکه‌ی برق در سطوح مختلف خرابی، مطابق با شکل (٦) براساس منحنی‌های شکنندگی در نظر گرفته می‌شود [20] و احتمال قرار گرفتن خطوط شبکه‌ی برق در هر یک از سطوح خرابی محاسبه شده است. در محاسبه‌ی احتمال بروز جرقه در اثر تخریب خطوط هوایی شبکه‌ی برق احتمال بروز جرقه در شبکه برق خسارت‌دیده ٦٠٪ فرض می‌شود [10].



شکل ٥ درخت خطای مورد استفاده در تحقیق



شکل ٦ منحنی‌های شکست شبکه‌ی توزیع برق هوایی برای چهار سطح خرابی مختلف [7]

تحلیل جریان گاز در لوله‌های خراب شده. با توجه به این‌که برای مدل‌سازی پیامد اشتعال پس از زلزله نیازمند دبی و فشار گاز داخل لوله در محل خرابی قطعات می‌باشیم، لذا در این قسمت دبی و فشار برای قطعات مورد نظر محاسبه شده است. به‌دلیل این‌که حجم و فشار گاز داخل لوله در فصول مختلف سال و هم‌چنین در طول شبانه روز به‌دلیل مصرف کمتر یا بیشتر، متفاوت می‌باشد؛ لذا ضروری است برای تحلیل جریان شبکه، زمان وقوع حادثه در نظر گرفته شود. به این منظور، زمان وقوع حادثه در فصل زمستان و در دو بازه‌ی زمانی صبح (ساعت ۹-۶) و شب (ساعت ۲۳-۱۸) به‌دلیل مصرف بیشتر (استفاده‌ی بیشتر از بخاری‌ها و اجاق گازها) و افزایش نرخ جریان داخل لوله‌های گاز در این فصل و زمان‌های مذکور، در نظر گرفته شده است.

به‌منظور برآورد دبی گاز و هم‌چنین افت فشار در محل خرابی قطعات، روابط متعددی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به رابطه‌ی برنولی (Bernouli's Equation)، رابطه‌ی کلی جریان (General Flow Equation)، رابطه‌ی فریتزیچ (Fritzsche Equation)، رابطه‌ی پن هندل اِی و بی (Panhandle A & B Equation)، رابطه‌ی مولر (Mueller Equation) و ... اشاره کرد [21]. در این مرحله ابتدا به‌منظور انتخاب رابطه‌ی مناسب برای تحلیل دبی و افت فشار در محل خرابی قطعات، از رابطه‌ی (٦) عدد رینولدز جریان برای لوله‌های مورد نظر محاسبه شده است. با توجه به این‌که عدد رینولدز جریان (Reynolds Number of Flow) از رابطه‌ی (٤)، $1/04*10^7$ برای لوله‌ی ۲۰ اینچی محاسبه می‌شود و از طرفی استفاده از رابطه‌ی پن هندل بی برای محدوده‌ی عدد رینولدز چهار تا ٤٠ میلیون دقیق می‌باشد [21]. بنابراین در این تحقیق رابطه‌ی پن هندل بی برای محاسبه‌ی افت فشار در محل خرابی قطعات، انتخاب شده است که در رابطه‌ی (٥) بیان شده است.

$$R_e = 0.5134\,(P_b/T_b)\,(GQ/\mu D) \qquad \text{(SI units)} \qquad (٤)$$

که در این رابطه P_b فشار پایه به kPa، T_b دمای پایه به K(273+°C)، G وزن مخصوص گاز، Q نرخ جریان گاز به m^3/day، D قطر داخلی لوله به mm، و ویسکوزیته گاز به poise می‌باشد [21].

$$Q = 1.002*10^{-2} E\left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.02} \left(\frac{P_1^2 - e^S P_2^2}{G^{0.961} T_f L_e Z}\right)^{0.51} D^{2.53} \qquad \text{(SI units)} \qquad (٥)$$

که در این رابطه Q نرخ جریان گاز به m^3/day، E کارایی خط لوله، P_b فشار پایه به kPa، T_b دمای پایه به K (273+°C)، P_1 فشار بالادست به kPa (absolute)، P_2 فشار پایین‌دست به kPa (absolute)، G وزن مخصوص گاز، T_f دمای متوسط جریان گاز به K (273+°C)، L_e طول قطعه لوله به km، Z ضریب تراکم‌پذیری گاز و D قطر داخلی لوله به mm می‌باشد [21].

سپس با استفاده از رابطه‌ی (٥) و با مشخص بودن دبی و فشار جریان در ابتدای هر یک از خطوط ۲۰ و ۳۰ اینچی منطقه‌ی مورد مطالعه، دبی و فشار گاز داخل لوله در محل خرابی هر یک از قطعات محاسبه شده است. قابل ذکر است، در قطعات شکسته شده فرض می‌شود کل حجم گاز داخل لوله تخلیه خواهد شد؛ بنابراین پس از قطعه‌ی شکسته‌شده محاسبات صورت نگرفته است.

تحلیل پیامد اشتعال. برای شبیه‌سازی پیامد اشتعال پس از زلزله، مدل‌های شناخته شده‌ای وجود دارد. در این مدل‌ها تأثیر عواملی چون پایداری جو و وزش باد منظور می‌شوند. اکثر مدل‌های موجود، پیچیده و شامل محاسباتی بسیار زمان‌بر هستند. لذا در این مرحله تمایل بسیار نسبت به استفاده از نرم‌افزارهای موجود برای مدل‌سازی وجود دارد. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به نرم‌افزار آلوها (Areal Location of Hazardous Atmospherres) یا نرم‌افزار فست

(Process Hazard Analysis Software Tool) اشاره کرد که توانایی مدل‌سازی رهایش مواد و پیامد ناشی از آنها را دارند. در این میان نرم‌افزار PHAST یکی از مشهورترین نرم‌افزارهای موجود در این زمینه است که در این مرحله از نرم‌افزار PHAST برای محاسبه‌ی شعاع آتش‌سوزی پس از زلزله استفاده شده است. اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی با نرم‌افزار PHAST در زیر آمده است:

داده‌های مربوط به منبع انتشار مواد. اطلاعات مورد نیاز در این بخش شامل نوع مواد، مقدار و شرایط عملیاتی نظیر دما و فشار مورد نظر می‌باشد. با توجه به این‌که بیش از ۹۰٪ گاز طبیعی را گاز متان تشکیل می‌دهد، لذا ماده‌ی مورد نظر در این تحقیق گاز متان در نظر گرفته شده است. حجم و فشار داخل قطعات لوله نیز بر طبق بخش قبلی (تحلیل جریان) به‌دست آمده است.

انتخاب سناریو. پس از تعیین مشخصات مواد موجود در فرآیند، باید نوع سناریوی محتمل را تعیین کرد. نرم‌افزار PHAST قادر به مدل‌سازی سناریوهای مختلفی به شرح زیر می‌باشد:

۱- شکست فاجعه‌بار (Catastrophic Rupture)
۲- شکست لوله (Line Rupture)
۳- شکست دیسک (Disk Rupture)
٤- نشت (Leak)
۵- انتشار در زمان معین (Fixed Duration)
٦- انتشار از شیرهای فشارشکن (Relief Valve)
۷- انتشار از لوله بلند (Long Pipeline)

سناریو واقعه‌ای است که می‌تواند منجر به رخداد یکی از مخاطرات فرآیندی؛ آتش، انفجار و یا رهایش مواد سمی شود. سناریوها در اکثر موارد به‌صورت نشتی و یا شکست محتمل در تجهیزات فرآیندی در نظر گرفته می‌شود به‌طوری‌که منجر به نشت مواد سمی و یا قابل‌اشتعال شوند. برای انتخاب سناریوها از استانداردهای ارائه‌شده توسط شرکت DNV مطابق جدول (۲) استفاده شده است [22].

جدول ۲ استانداردهای ارائه‌شده توسط شرکت DNV برای انتخاب سناریوها [22]

تجهیزات	قطر نشت مورد بررسی
لوله های با قطر کمتر از ۱/۵ اینچ	۵ mm و شکست کامل
لوله های با قطر بین ۲ تا ٦ اینچ	۵ mm، ۲۵ mm و شکست کامل
لوله با قطر بین ۸ تا ۱۲ اینچ یا بالاتر	۵ mm، ۲۵ mm، ۱۰۰ mm و شکست کامل

با توجه به این‌که در این تحقیق در منطقه مورد مطالعه لوله‌های ۲۰ و ۳۰ اینچی مدنظر می‌باشند، لذا این لوله‌ها بر طبق جدول (۲) در ردیف لوله با قطر بین ۸ تا ۱۲ اینچ، یا بالاتر قرار می‌گیرند که به‌طور تصادفی ابعاد پارگی متناظر با لوله‌های گفته شده انتخاب گردیده است.

شرایط آب و هوایی. با توجه به تأثیرگذار بودن نوع شرایط آب و هوایی بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی حوادث، یکی از الزامات مدل‌سازی، تعیین شرایط آب و هوایی و پارامترهای مربوط به آن می‌باشد. به این منظور باید از اطلاعات هواشناسی ثبت شده در منطقه‌ی تحت بررسی استفاده نمود که در زیر آمده است [22]:

۱- دمای هوا و زمین (سطح خاک): ۱۲ °C
۲- رطوبت هوا: ٦۰٪
۳- سرعت و جهت وزش باد: ٤m/s و در جهت غربی
٤- شرایط جغرافیایی (ناهمواری سطح): ۳m

نتایج حاصل از این آنالیز به‌عنوان ورودی برای هر قطعه از لوله در نرم‌افزار GIS وارد می‌گردد. به‌دلیل این‌که حجم داده‌های وروردی و اطلاعات خروجی زیاد است و هم‌چنین با توجه به مکانی بودن کلیه‌ی داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای این منظور انتخاب شده است. نتایج خروجی آنالیز

PHAST شامل هفت شعاع در جهت باد برای حالات نشت یا شکست، و هفت شعاع در جهت عمود بر باد برای هر دو حالت نشت یا شکست می‌باشد. در حالت کلی برای نشت یا شکست خطوط لوله، هفت آنالیز آتش به‌صورت زیر موجود می‌باشد:

۱- آتش فورانی برای شدت گرمای $۴kw/m^2$

۲- آتش فورانی برای شدت گرمای $۱۲/۵kw/m^2$

۳- آتش فورانی برای شدت گرمای $۳۷/۵kw/m^2$

٤- آتش فورانی برای احتمال مرگ ۱٪

۵- آتش فورانی برای احتمال مرگ ۱۰٪

٦- آتش فورانی برای احتمال مرگ ۱۰۰٪

۷- انفجار خطوط لوله برای شدت موج فشاری بیش از ۲psig

با استفاده از نرم‌افزار GIS، ابعاد مربوط به هفت آنالیز آتش به شکل بیضی بر روی مرکز قطعات خطوط لوله‌ی گاز که دچار اشتعال می‌شوند، انداخته شده و موارد زیر محاسبه شده است:

۱- مساحت کاربری‌هایی که تحت تأثیر آتش ایجادشده در اثر زلزله قرار گرفته‌اند.

۲- کل مساحتی که تحت تأثیر آتش ایجادشده در اثر زلزله قرار گرفته‌اند.

۳- تعداد کل نفراتی که تحت تأثیر آتش ایجادشده در اثر زلزله قرار گرفته‌اند.

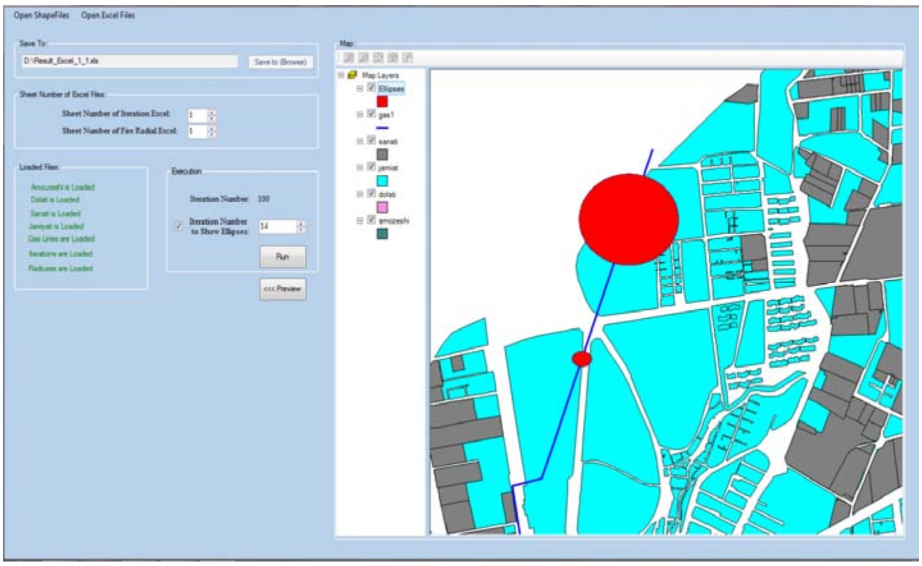
لازم به ذکر است که در محاسبه‌ی مساحت‌های گفته شده، اثر هم‌پوشانی آتش‌سوزی‌هایی (بیضی‌ها) که در قطعات مجاور یکدیگر اتفاق می‌افتند، در نظر گرفته شده است.

مراحل فوق برای هر سناریوی زلزله، با توجه به روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی احتمالات ممکن از طریق تعداد دفعات زیاد (۱۰ هزار بار) تکرار می‌شود تا عدم قطعیت‌های مربوط به این‌که در هر سناریوی زلزله کدام لوله‌ها در معرض شکست یا نشت و اشتعال قرار می‌گیرند، مدل‌سازی گردد.

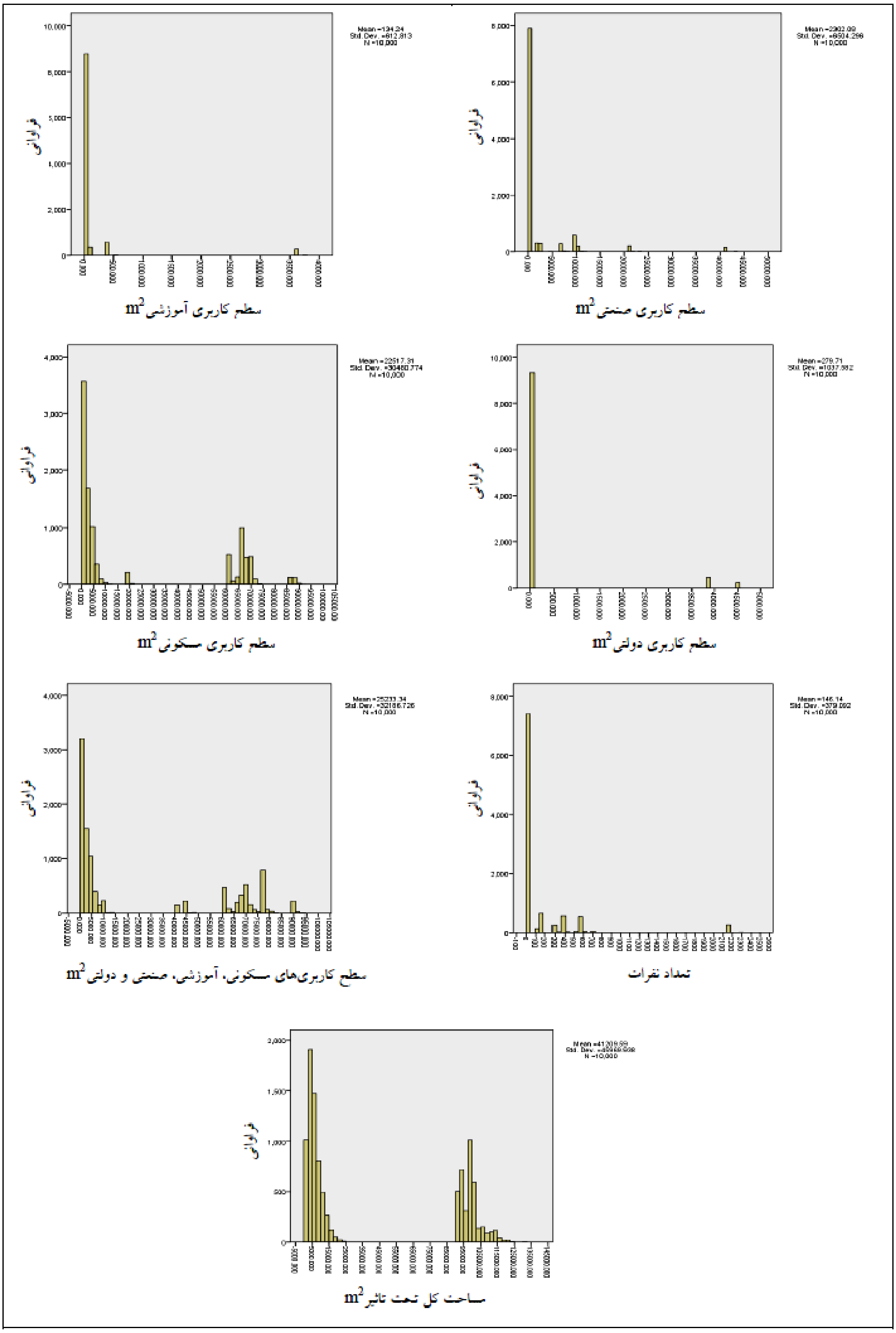
به‌عنوان نمونه در شکل (۷)، در معرض قرارگیری کاربری‌ها در برابر آتش‌سوزی برای یکی از حالات (تکرار) سناریو ۱ نشان داده شده است که با برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار GIS به‌دست آمده است.

تحلیل نتایج

نتایج خروجی برای سناریوهای در نظر گرفته شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS تحلیل شد. به‌عنوان نمونه نتایج مربوط به سناریوی شماره‌ی ۲ در بازه‌ی زمانی ساعت ۲۳-۱۸ برای آتش‌سوزی با گرمای $٤kw/m^2$ در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷ نمایش گرافیکی مربوط به میزان در معرض قرارگیری کاربری‌ها در برابر آتش $٤kw/m^2$ برای یکی از حالات (تکرار ١٤) سناریوی ۱



شکل ۸ نتایج مربوط به آتش‌سوزی با گرمای ٤w/m² برای سناریوی شماره‌ی ۲ در بازه‌ی زمانی۲۳–۱۸

تأثیر جایگزینی لوله‌های ترد با لوله‌های انعطاف‌پذیر

با توجه به نتایج بدست آمده به‌نظر می‌رسد، به‌منظور پیشگیری از حوادث ثانویه‌ی ناشی از وقوع زلزله که در اثر تخریب شبکه‌ی توزیع گاز شهری و نشت گاز محتمل می‌باشد، ارائه‌ی راهکارهای مقاوم‌سازی و کاهش اثرات ضروری باشد. به این منظور، به‌عنوان نمونه اثر جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به‌جای لوله‌های ترد، تمام مراحل تحلیل با فرض جایگزین کردن لوله‌های ترد با لوله‌های انعطاف‌پذیر دوباره صورت گرفت و نتایج هر سه سناریو در حالت عادی (لوله‌ی ترد) و در حالت جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به‌جای لوله‌های ترد، مقایسه شد.

الف- سناریوی اول؛ مقایسه‌ی نتایج دو حالت مذکور (حالت اول: استفاده از لوله‌های ترد، حالت دوم: جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به‌جای لوله‌های ترد) در سناریوی اول عبارتند از:

۱- به‌طور متوسط از ٤ نشت، ۱ شکست و ۲ اشتعال در حالت عادی (حالت اول)، به ۲ نشت (۵۰٪ کاهش)، ۰ شکست (۱۰۰٪ کاهش) و ۰ اشتعال (۱۰۰٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۲- به‌طور متوسط مجموع مساحت سوخته‌ی ٤ کاربری ذکرشده (کاربری مسکونی، صنعتی، آموزشی و دولتی) در اثر وقوع آتش‌سوزی با گرمای kw/m^2 ۳۷/۵ در بازه‌ی زمانی ۹-٦، از ۱٤۷۹ مترمربع در حالت عادی به ۲۵۰ مترمربع (۸۳٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۳- به‌طور متوسط از حدود ۲ نفری که در معرض احتمال مرگ ۱۰۰٪ در بازه‌ی زمانی ۹-٦ در حالت عادی بودند، به ۰ نفر (۱۰۰٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

٤- به‌طور متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر در اثر موج انفجار ۲psi ایجادشده در بازه‌ی ۹-٦، از ۲۲۷۰٤ مترمربع در حالت عادی به ۳٤٤۷ مترمربع (۸۵٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۵- در شدیدترین حالت که مربوط به وقوع آتش‌سوزی با گرمای ٤kw/m^2 می‌باشد؛ در بازه‌ی زمانی ۹-٦ نتایج زیر حاصل شد:

به‌طور متوسط مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکرشده از ۱۸۷٤۷ مترمربع به ۳۱٦۸ مترمربع (۸۳٪ کاهش)، متوسط تعداد افراد تحت تأثیر از ۱۰۹ نفر به ۲۰ نفر (۸۲٪ کاهش)، متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر از ۳۸۵۹۲ مترمربع به ۵۸٤۲ مترمربع (۸۵٪ کاهش) تقلیل یافت.

۱- به‌طور متوسط مجموع مساحت سوخته‌ی ٤ کاربری ذکرشده (کاربری مسکونی، صنعتی، آموزشی و دولتی) در اثر وقوع آتش‌سوزی با گرمای kw/m^2 ۳۷/۵ در بازه زمانی۲۳-۱۸، از ۱۷۵۳ مترمربع در حالت عادی به ۲۹۵ مترمربع (۸۳٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۲- به‌طور متوسط از حدود ٤ نفری که در معرض احتمال مرگ ۱۰۰٪ در بازه زمانی ۲۳-۱۸در حالت عادی بودند، به ۱ نفر (۷۵٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۳- به‌طور متوسط مساحت منطقه تحت تأثیر در اثر موج انفجار ۲psi ایجاد شده در بازه ۲۳-۱۸، از ۲۳٦۵۸ متر مربع در حالت عادی به ۳۵۹۵ مترمربع (۸۵٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

٤- در شدیدترین حالت که مربوط به وقوع آتش-سوزی با گرمای ٤kw/m^2 می‌باشد؛ در بازه زمانی ۲۳-۱۸ نتایج زیر حاصل شد:

به‌طور متوسط مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده از ۲۰۹۳۰ مترمربع به ۳۵۲۳ مترمربع (۸۳٪ کاهش)، متوسط تعداد افراد تحت تأثیر از ۱۳۰ نفر به ۲۳ نفر (۸۲٪ کاهش)، متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر از ٤۲۷۷۸ مترمربع به ٦٤٤۵ مترمربع (۸۵٪ کاهش) تقلیل یافت.

ب- سناریوی دوم؛ مقایسه‌ی نتایج دو حالت مذکور (حالت اول: استفاده از لوله‌های ترد، حالت دوم:

جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به‌جای لوله‌های ترد) در سناریوی دوم عبارتند از:

۱- به‌طور متوسط از ٤ نشت، ۱ شکست و ۲ اشتعال در حالت عادی (حالت اول)، به ۱ نشت (۷۵٪ کاهش)، ۰ شکست (۱۰۰٪ کاهش) و ۰ اشتعال (۱۰۰٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۲- به‌طور متوسط مجموع مساحت سوخته‌ی ٤ کاربری ذکرشده (کاربری مسکونی، صنعتی، آموزشی و دولتی) در اثر وقوع آتش‌سوزی با گرمای kw/m^2 ۳۷/۵ در بازه‌ی زمانی ۹-٦، از ۱۹۷۰ مترمربع در حالت عادی به ۳۸۲ مترمربع (۸۱٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۳- به‌طور متوسط از حدود ۳ نفری که در معرض احتمال مرگ ۱۰۰٪ در بازه‌ی زمانی ۹-٦ در حالت عادی بودند، به ۰ نفر (۱۰۰٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

٤- به‌طور متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر در اثر موج انفجار ۲psi ایجاد شده در بازه‌ی ۹-٦، از ۲۱۲۲٦ مترمربع در حالت عادی به ۳٦۹۳ مترمربع (۸۳٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۵- در شدیدترین حالت که مربوط به وقوع آتش‌سوزی با گرمای ٤kw/m^2 می‌باشد؛ در بازه‌ی زمانی ۹-٦ نتایج زیر حاصل شد:

به‌طور متوسط مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده از ۲۳۰٤۸ مترمربع به ٤۲۷۸ مترمربع (۸۱٪ کاهش)، متوسط تعداد افراد تحت تأثیر از ۱۲۸ نفر به ۲۲ نفر (۸۳٪ کاهش)، متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر از ۳۷۵۷۷ مترمربع به ٦۵۹۳ مترمربع (۸۲٪ کاهش) تقلیل یافت.

۱- به‌طور متوسط مجموع مساحت سوخته‌ی ٤ کاربری ذکرشده (کاربری مسکونی، صنعتی، آموزشی و دولتی) در اثر وقوع آتش‌سوزی با گرمای kw/m^2 ۳۷/۵ در بازه‌ی زمانی۲۳-۱۸، از ۲۲۵۰ مترمربع در حالت عادی به ٤۳۲ مترمربع (۸۰٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۲- به‌طور متوسط از حدود ٤ نفری که در معرض احتمال مرگ ۱۰۰٪ در بازه‌ی زمانی ۲۳-۱۸در حالت عادی بودند، به ۱ نفر (۷۵٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۳- به‌طور متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر در اثر موج انفجار ۲psi ایجاد شده در بازه‌ی ۲۳-۱۸، از ۲۲۱۲۵ مترمربع در حالت عادی به ۳۸٤۹ مترمربع (۸۳٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

٤- در شدیدترین حالت که مربوط به وقوع آتش‌سوزی با گرمای ٤kw/m^2 می‌باشد؛ در بازه‌ی زمانی ۲۳-۱۸ نتایج زیر حاصل شد:

به‌طور متوسط مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده از ۲۵۲۳۳ مترمربع به ٤٦۵۱ مترمربع (۸۲٪ کاهش)، متوسط تعداد افراد تحت تأثیر از ۱٤٦ نفر به ۲۵ نفر (۸۳٪ کاهش)، متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر از٤۱۲۱۰ مترمربع به ۷۱۷۳ مترمربع (۸۳٪ کاهش) تقلیل یافت.

ج- سناریوی سوم؛ مقایسه‌ی نتایج دو حالت مذکور (حالت اول: استفاده از لوله‌های ترد، حالت دوم: جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به‌جای لوله‌های ترد) در سناریوی سوم عبارتند از:

۱- به‌طور متوسط از ۱ نشت، ۰ شکست و ۰ اشتعال در حالت عادی (حالت اول)، به ۰ نشت (۱۰۰٪ کاهش)، ۰ شکست (۰٪ کاهش) و ۰ اشتعال (۰٪ کاهش) در حالت دوم تقلیل یافت.

۲- نتایج نشان می‌دهد که برای منطقه‌ی مورد نظر، گسل شمال تهران نسبت به سناریوهای گسل شمال ری و گسل جنوب ری ارجحیت ندارد، که این امر با نتایج مطالعات جایکا هم‌خوانی دارد. در این قسمت فقط نتایج مربوط به شدیدترین حالت ذکر شده است. در شدیدترین حالت که مربوط به

وقوع آتش‌سوزی با گرمای ٤kw/m^2 می‌باشد؛ در بازه‌ی زمانی ۹-٦ نتایج زیر حاصل شد:

به‌طور متوسط مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده از ۱٦۲ مترمربع به ۱ مترمربع (۹۹٪ کاهش)، متوسط تعداد افراد تحت تأثیر از ۱ نفر به ۰ نفر (۱۰۰٪ کاهش)، متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر از ۲۲٦ مترمربع به ۳ مترمربع (۹۹٪ کاهش) تقلیل یافت.

در بازه‌ی زمانی ۲۳-۱۸ نیز نتایج زیر حاصل شد:

به‌طور متوسط مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده از ۱۷۵ مترمربع به ۱ مترمربع (۹۹٪ کاهش)، متوسط تعداد افراد تحت تأثیر از ۱ نفر به ۰ نفر (۱۰۰٪ کاهش)، متوسط مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر از ۲٤۷ مترمربع به ۳ مترمربع (۹۹٪ کاهش) تقلیل یافت.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی برای محاسبه‌ی احتمال وقوع اشتعال ناشی از خطوط لوله‌ی گاز و شبکه‌ی توزیع برق پس از زلزله و تبعات آن بر روی کاربری‌های مختلف در منطقه‌ی ۲۰ شهر تهران ارائه گردید. به این منظور، ابتدا با تحلیل خطر و برآورد آسیب‌پذیری زلزله به تحلیل خطر آتش‌سوزی پس از زلزله پرداخته شد. سپس با تحلیل جریان گاز در خطوط لوله، پیامد اشتعال پس از زلزله بر روی کاربری‌های مسکونی، صنعتی، آموزشی و دولتی مورد تحلیل قرار گرفت. در ادامه برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در مراحل تحلیل، حالات مختلف خسارت لرزه‌ای خطوط لوله‌ی شبکه‌ی گاز و آتش‌سوزی پس از آن براساس روش مونت‌کارلو از طریق دفعات تکرار زیاد (۱۰ هزار بار) شبیه‌سازی شد. مراحل تحقیق برای سه سناریوی گسل شمال ری، گسل جنوب ری و گسل شمال تهران پیاده شد. براساس نتایج حاصل از این تحقیق؛ در شدیدترین حالت که مربوط به سناریوی دوم (گسل جنوب ری) می‌باشد، به‌طور متوسط وقوع ٤ نشت، ۱ شکست و ۲ اشتعال ناشی از خرابی خطوط لوله ۲۰ و ۳۰ اینچ، مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده ۲۵۲۳۳ مترمربع، تعداد افراد تحت تأثیر ۱٤٦ نفر و مساحت منطقه‌ی تحت تأثیر ٤۱۲۱۰ مترمربع در اثر وقوع آتش‌سوزی با گرمای ٤kw/m^2 در بازه‌ی زمانی ۲۳-۱۸ محاسبه شد. با اعمال راهکار مبتنی بر جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر به‌جای لوله‌های ترد، نتایج ذکر شده در حالت نشت به میزان ۷۵٪، در حالت شکست به میزان ۱۰۰٪ و در حالت اشتعال به میزان ۱۰۰٪، مجموع مساحت تحت تأثیر ٤ کاربری ذکر شده به میزان ۸۲٪، تعداد افراد تحت تأثیر به میزان ۸۳٪ و مساحت منطقه تحت تأثیر ۸۳٪ تقلیل یافت.

مراجع

۱. بختیاری، س.، "بررسی حوادث حریق ناشی از زلزله در جهان و تهیه راهنمای حفاظت ساختمانها در برابر آتش با در نظر گرفتن خطرات و تخریب‌های احتمالی ناشی از زلزله"، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی (پژوهشکده سوانح طبیعی)، (۱۳۸٦).

2. Lee, S. W., Davidson, R.A, "Review of Forest, Compartment, and Wildland-Urban Interface Fire Modeling and Their Relation to Fire Following Earthquake Models", *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, (2006).

3. Mizuno, H., "On outbreak of fires in earthquakes", Dissertation, Department of Architecture", *University of Kyoto*, (1978).

4. Scawthorn, C., Cowell, A. D and Borden, F., "Fire-related Aspects of The Northridge Earthquake",

Report prepared for Building and Fire Research Laboratory, NIST-GCR-98-743, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, (1997).

5. Cousins, W. J., Dowrick, D. J. and Sritharan, S., "Fire following earthquake", *In Proceedings of the Institution of Fire Engineers Conference*, New Plymouth, August, (1991).
6. Eidinger, J. M., Goettel, K. A. and Lee, D., "Fire and economic impacts of earthquakes", *Proceedings of the 4th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA*., pp. 80-87, ASCE, (1995).
7. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Earthquake Loss Estimation Methodology", Chapter 4, 8. Hazus 99-SR2, Technical Manual, Fema, Washington D.C., (1999).
8. Trifunace, MD., Todorovaska, MI., "The Northridge, California, earthquake 0f 1994: fire ignition by strong shaking", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* Elsevier Science Ltd., Vol. 17, pp. 165–175, (1998).
9. Williamson, R. B., Groner, N., "Ignition of fires following earthquakes associated with natural gas and electric distribution systems", *Peer directed studies program for reducing seismic vulnerability of gas and electrical distribution and transmission systems,* Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, (2000).
10. Zolfaghari, M., Peyghaleh, E., Golmoradi, L. and Nasirzadeh, Gh., "Urban utility ignition model, a probabilistic approach for modeling fire following earthquake", *In The 14th world conference on earthquake engineering*, Beijing, (2008).
11. Yildiz, S. S., Karaman, H., "Developing a Physics-based Model for Post-Earthquake Ignitions". *9th International ISCRAM Conference – Vancouver, Canada,* (2012).
12. Scawthorn, C., Eidinger, J.M., Schiff, A.J., “Fire following earthquake”, ASCE, USA, (2005).
13. Behnamfar, F., Rajabipour, A., "Probabilistic estimation of fire spreading following an earthquake due to gas pipeline damage", *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, (2008).
14. Esposito, S., "Systemic seismic risk analysis of gas distribution networks", Universita` di Napoli Federico II, (2011).

۱۵. شهرداری منطقه ۲۰. (بی تا). بازیابی در ۱۷ آذر ۱۳۹۱. از http://region20.tehran.ir

۱۶. بربریان، م. قریشی، م. ارژنگ روش، ب. و مهاجر اشجعی، ا.، "پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه-گسلش در گستره تهران وپیرامون"، سازمان زمین شناسی کشور، (۱۳۷۱).

17. Japan International Cooperation Agency (JICA), "The Study on Seismic Microzoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran", Final Report, (2000).

۱۸. زارع، م.، "مبانی تحلیل خطر زمین‌لرزه"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، (۱۳۸۸).

19. Kazemi, A., Razeghi H, and Ghodrati Amiri, G., "A New Method for Employment of Deterministic Attenuation Relationship in Probabilistic Seismic Hazard Analysis", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing),* Vol. 11, No. 1. PP. 61-73, (2011).
20. Milutinovic, Z., Trendafiloski, G., "An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns", RISK_UE Contract: EVK4-CT-2000-00014, (2003).
21. Menon, E. S., “Gas pipeline hydraulics”. Chapter 2. CRC Press, (2005).
22. Weather base, http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=45704&cityname=Tehran-Iran&set=metric, Accessed June 26, (2010).